doi:10.13866/j. azr. 2019. 06. 29

尼龙网方格沙障防风效应复变规律①

魏翔鸿， 左合君， 闫 敏， 贾光普

（内蒙古农业大学沙漠治理学院，内蒙古自治区风沙物理与防沙治沙工程重点实验室，内蒙古 呼和浩特 010011）

摘 要：方格沙障的布设参数直接影响防风效应的复变作用，定量表达其复变规律，对于沙障配置模式的确定具有重要意义。在乌兰布和沙漠机械整平的风沙观测场，铺设9种不同高度、规格的尼龙网方格沙障，观测其在不同风速背景下的风速流场特征，揭示方格沙障防风效应的复变规律。结果表明：尼龙网方格沙障防风效应复合变化受不同指示风速下，沙障高度与规格共同的影响。沙障内部0.1 m高度的风速随防护宽度的增加呈对数函数递减，指示风速增大1 m·s^{-1}，风速衰减率增加0.07倍；沙障高度增大0.1 m，风速衰减率增加0.20倍；方格边长增大1 m，风速衰减率减小0.07倍。观测的9种规格方格沙障，30 cm高度1 m×1 m规格沙障复变作用最强，15 cm高度2 m×2 m规格沙障复变作用最弱。该结果可为确定沙障合理防护宽度、节约沙障铺设成本、优化沙障布设技术提供基础数据和理论支撑。

关键词：尼龙网沙障；风速流场；防风效应；复变规律；乌兰布和沙漠

沙障作为荒漠化防治工程中控制流沙和降低近地表土壤风蚀的主要措施之一[1]，能够改变流场结构，降低近地层风速，阻滞过境风沙流，促使沙粒减速沉积，从而达到防风固沙的目的[2]，其中半隐蔽式格状沙障是应用最为广泛的固沙措施[3]。防风效应是衡量沙障防护效果的重要指标，近地层风速变化决定着地表蚀积分布[4]。方格沙障相互连接，防风效应叠加增强，风速非线性衰减[5-6]，表明方格沙障防风效应存在复合变化。已有学者对方格沙障防风效应复合变化进行了初步探究。研究发现，近地表气流进入沙障，受沙障阻滞作用，风速迅速降低。气流向下风向运动过程中，风速持续降低，但降幅缓慢[6]，这一趋势不会无限延续，风速随着防护距离的增大逐渐稳定[7]。同时，指示风速增加，同一沙障相同高度处的风速随之增大；沙障高度增高和规格减小使得沙障防风效应增强[8]；气流在沙障内运动，小规格沙障内流场很快趋于平稳，较大规格沙障内流场呈现波动状态，难以稳定[9]。因而，沙障防风效应复合变化明显受到不同指示风速、沙障设置参数等因素影响。上述研究对方格沙障防风效应复变规律进行了诸多分析，能够确定出单一规格沙障内风速大幅降低的范围及风速趋于稳定的范围，对于实践中沙障铺设具有一定的参考价值，但是实践中风况的复杂性以及设障参数的多样性，使得沙障有效控制风蚀的防护范围难以确定，在线性工程防沙中，固沙带宽度设计差异较大[10-11]。显然，缺乏方格沙障防风固沙效应定量化的复变规律理论指导，是防沙工程中存在的主要问题，因此，定量地确定方格沙障防风效应的复变规律，是防沙工程设计中的关键。

尼龙网作为一种新型沙障材料，在科学研究和生产实践中被广泛应用[12]。尼龙网沙障具有时效性强和方便施工的优点，试验以尼龙网方格沙障为研究对象。研究表明，方格沙障防风效应复合变化是多因素共同作用的结果，地形对其有重要影响，因此，采用机械整平的方式建立风沙观测场，对不同高度与规格尼龙网方格沙障进行风速观测，定量确定方格沙障防风效应复变规律，计算合理的方格沙障铺设宽度，为节约方格沙障铺设成本、优化布设技术提供基础数据支撑。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于磴口—乌斯太穿沙公路2 km处，地

① **收稿日期：**2019-01-22； **修订日期：**2019-04-26
基金项目：国家重点研发计划“乌兰布和沙漠生态园区沙产业技术和模式集成与示范”（2016YFC0501009）资助
作者简介：魏翔鸿（1995-），男，硕士研究生，主要研究方向为荒漠化防治. E-mail：weixh0225@126.com
通讯作者：左合君. E-mail：Zuohj@126.com

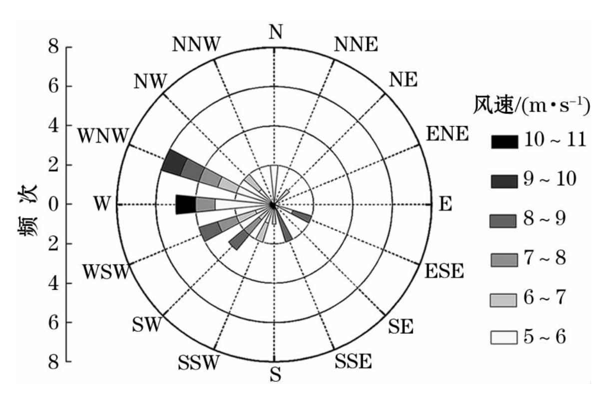


图 1　2018 年 4 月观测场起沙风玫瑰图

Fig. 1　Rose diagram of sand-blown wind at the observation field in April 2018

理坐标 40°10′21″ ~ 40°10′23″ N,106°48′17″ ~ 106°48′19″ E。该区属于中温带大陆性干旱气候,风沙活动频繁(图 1),全年盛行西风、西南风,起沙风多为 W、WSW、WNW 风。多年平均风速 3.7 m·s^{-1},最大风速 21 m·s^{-1},全年风沙日数 85 d。试验地西北方向为高大沙丘和沙丘链,地表无植被覆盖,沙源充足,加之该地风力强劲,能够为风沙活动提供动力条件,流沙以每年 3~5 m 的速度向公路快速移动,是沙障试验观测的理想场所[13]。

1.2　研究方法

1.2.1　沙障铺设　为了消除地形起伏对风况的干扰[14],本试验在磴—乌穿沙公路上风向 40 m 处,采用机械整平的方式建立沙障防风固沙效应观测场。于 2017 年 10 月铺设 9 个长 25 m,宽 36 m 的 30 cm、20 cm、15 cm 高度,1 m×1 m、1.5 m×1.5 m、2 m×2 m 规格,共计 9 种组合的尼龙网方格沙障。为降低障体风压,减轻沙障底部掏蚀[15],尼龙网采用上疏下密型结构(孔隙度上为 55%,下为 45%),如图 2 所示。

1.2.2　风速流场测定　野外试验于 2018 年 4 月进行,观测指标包括旷野与沙障内部风速风向。使用美国生产的 HOBO 风速风向采集仪,测定各规格沙障中间一列障前、障内及障后风速值,共 13 个测点。如图 3 所示,测点位置即旷野、沙障迎风侧距沙障边 0.5 m、沙障内 0.5 m、3.5 m、6.5 m、9.5 m、13.6 m、17.5 m、21.5 m、25.6 m、29.6 m、33.5 m 以及沙障后 0.5 m。旷野测点为空白对照,设置 0.1 m、0.2 m、0.4 m、1 m 与 2 m 高度风杯,其余各测点风杯高度为 0.1 m 与 0.4 m。风速观测步长为 2 s,所测风速均为瞬时风速,测得不同指示风速下,不同高度、

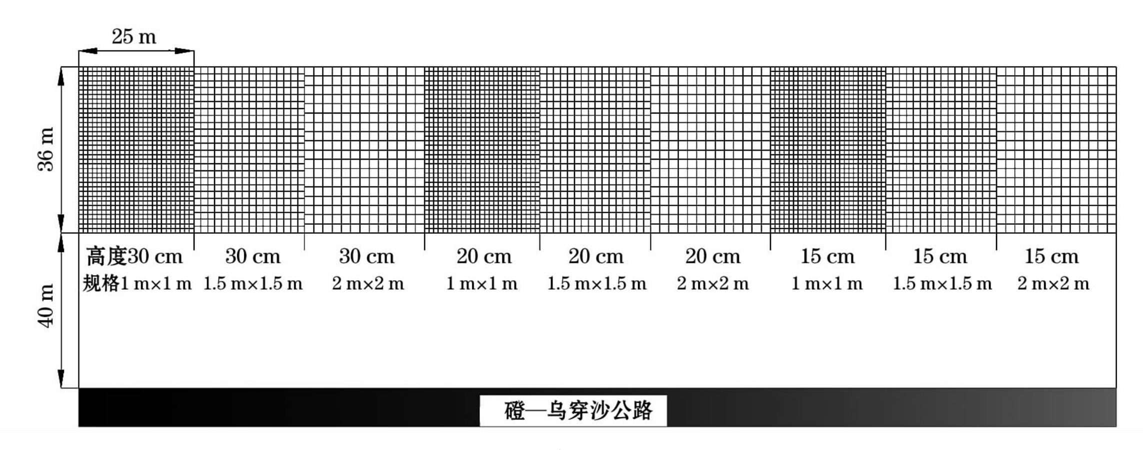


图 2　沙障布设示意图

Fig. 2　Schematic diagram of sand barrier layout

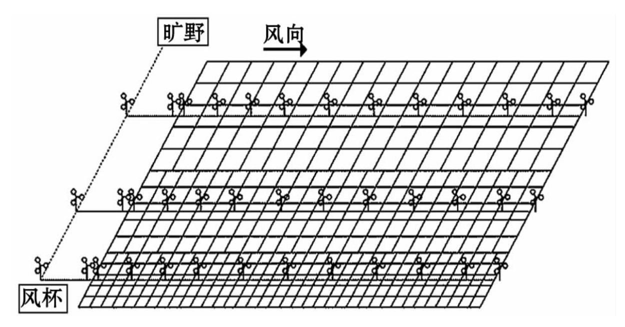


图 3　风杯测点布设示意图

Fig. 3　Schematic diagram of wind-cup measuring points

规格沙障内风速值。观测之后,结合旷野风向标,从中选择来流方向与沙障铺设方向垂直时刻的风速数据进行处理分析。

1.2.3　相对风速　采用相对风速对沙障防风能力变化进行定量分析。计算方法如下:

$$u' = \frac{u_Z}{u_{Z0}} \times 100\% \tag{1}$$

式中:u'为相对风速(%);u_Z 为测点 Z 高度处风速(m·s^{-1});u_{Z0}为旷野 Z 高度处风速(m·s^{-1})。

1.2.4 复变规律确定　单格沙障具有一定防风效应,随着沙障格数的累加,沙障整体的防风效应大于单格防风效应之和[5],本文将这种沙障非线性削弱风速的作用称为防风效应复变作用,定量化研究其复变作用,以揭示防风效应的复合变化规律。研究证实,垂直方向沙障内风速随高度的变化存在 $U=f(Z)$ 的函数关系[16],如公式(2),而未指出水平方向沙障内风速 U 与距离 D 的变化规律 $U=f(D)$。

$$U=a+b\cdot\ln(Z) \tag{2}$$

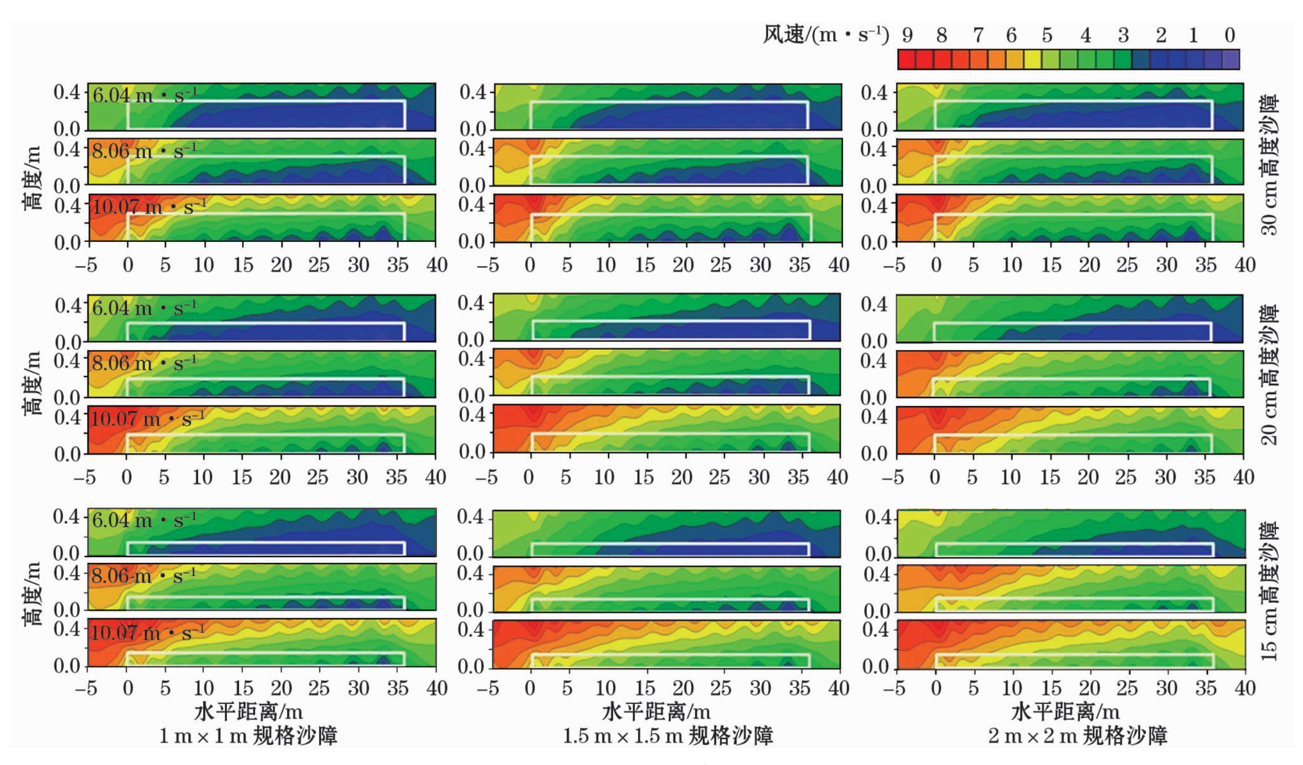
式中:U 为 Z 处的风速($m\cdot s^{-1}$);a 和 b 为常数,与摩阻速度和空气动力学粗糙度有关;Z 为测点高度(m)。

沙障内水平风速变化比垂直风速变化更能体现沙障的防风固沙效益,因此,对沙障各水平测点不同梯度的风速进行多函数拟合,通过判定系数(R^2)找出水平梯度下风速变化的最优拟合函数形式。沙障内风速 U 的变化受旷野风速 V、沙障高度 H 与沙障规格 M 等因素的影响,故选择上述因子对拟合系数进行线性回归修正。

2 结果与分析

2.1 沙障风速流场特征

图 4 为指示风速 6.04 $m\cdot s^{-1}$、8.06 $m\cdot s^{-1}$ 和 10.07 $m\cdot s^{-1}$ 下的不同高度、规格沙障风速流场图。由图 4 可以看出,不同高度、规格沙障内风速流场变化趋于一致。流场线在沙障前小幅度抬升,表明沙障对沙障前风速有减弱作用,但效果不明显;气流进入沙障前缘,流场线持续抬升,风速明显降低,高于沙障处气流汇聚加速;气流在沙障内继续向下风向运动,底层气流受沙障干扰较大,流场线加密,风速急剧降低;随着气流进入沙障纵深增加,流场线变化相对平稳,底层气流持续稳定减小,出现弱风区或静风区,沙障上方出现低速区,风速减弱效果明显;气流穿过沙障后,流场线下沉并开始分离,风速有恢复的趋势。



注:白色边框表示沙障纵断面。

图 4　沙障风速流场

Fig. 4　Wind velocity field of sand barrier

由于沙障高度与规格的不同,其减弱风速的能力存在差异。对于 6.04 $m\cdot s^{-1}$ 指示风速而言,各沙障均能在较短距离内将 0.1 m 高度风速降至起沙风速以下;指示风速 8.06 $m\cdot s^{-1}$ 时,不同高度、不同规格沙障间风速差异明显,30 cm 高度 3 种规格(1 m×1 m、1.5 m×1.5 m、2 m×2 m)沙障在进入沙障 3.5 m 范围内将 0.1 m 高度处风速降低至起沙

风以下,20 cm 高度 3 种规格沙障分别在气流进入沙障后 3.5 m、6.5 m、9.5 m 将 0.1 m 高度处风速降至起沙风以下,15 cm 高度沙障则依次在 3.5 m、6.5 m、13.6 m 将 0.1 m 高度处风速控制在起沙风速以下;指示风速 10.07 m·s^{-1}时,沙障间风速变化的差异更加显著,30 cm 高度 3 种规格沙障,均能够在 6.5 m 范围内,20 cm 高度沙障依次在 6.5 m、13.6 m、13.6 m 范围内,15 cm 沙障依次在 6.5 m、13.6 m、21.5 m 范围内,将 0.1 m 高度处风速降低至临界起沙风速。

2.2 沙障内近地表 0.1 m 高度相对风速变化

从图 5 得知,各规格沙障均能不同程度减小风速,总体表现为先降低后稳定的趋势。沙障前缘气流速度迅速降低,随着水平距离的增加,相对风速持续降低,但其降低幅度放缓,风速趋于稳定。就沙障规格而言,不同高度、规格沙障内相对风速差异明显,指示风速 6.04 m·s^{-1}时,30 cm、20 cm 和 15 cm 高度沙障内相对风速分别为 26.57%、29.39% 和 32.57%;1 m×1 m、1.5 m×1.5 m 和 2 m×2 m 规格沙障内相对风速分别为 26.57%、27.16% 和 27.04%。指示风速 8.06 m·s^{-1}时,3 种高度沙障内相对风速分别为 27.16%、39.42% 和 41.93%;3 种规格沙障内相对风速分别为 29.39%、39.42% 和 42.85%。指示风速 10.07 m·s^{-1}时,3 种高度沙障内相对风速分别为 27.04%、42.85% 和 48.96%;3 种规格沙障内相对风速分别为 32.57%、41.93% 和 48.96%。分析可知,沙障高度较沙障规格对风速的影响更大。9 种高度、规格尼龙网方格沙障内风速随防护距离的增大和沙障格数的累加均出现非线性降低,证明方格沙障的防风效果存在前后方格间的复变作用。

2.3 沙障防风效应复变规律

沙障的复变作用加强了沙障的防护效果,致使气流进入沙障后急剧降低。为探究沙障防风效应的复变规律,本文根据已有观测数据,对沙障内各测点 0.1 m 高度风速进行多种形式函数拟合,选择最优函数形式(表 1),各沙障内风速 U(m·s^{-1})随着沙障防护距离 D(m)的增加,均以 $U=a\ln(D)+b$ 的对数函数形式衰减(其中 a 为衰减率),且拟合优度较好,皆达到了 0.8 以上。

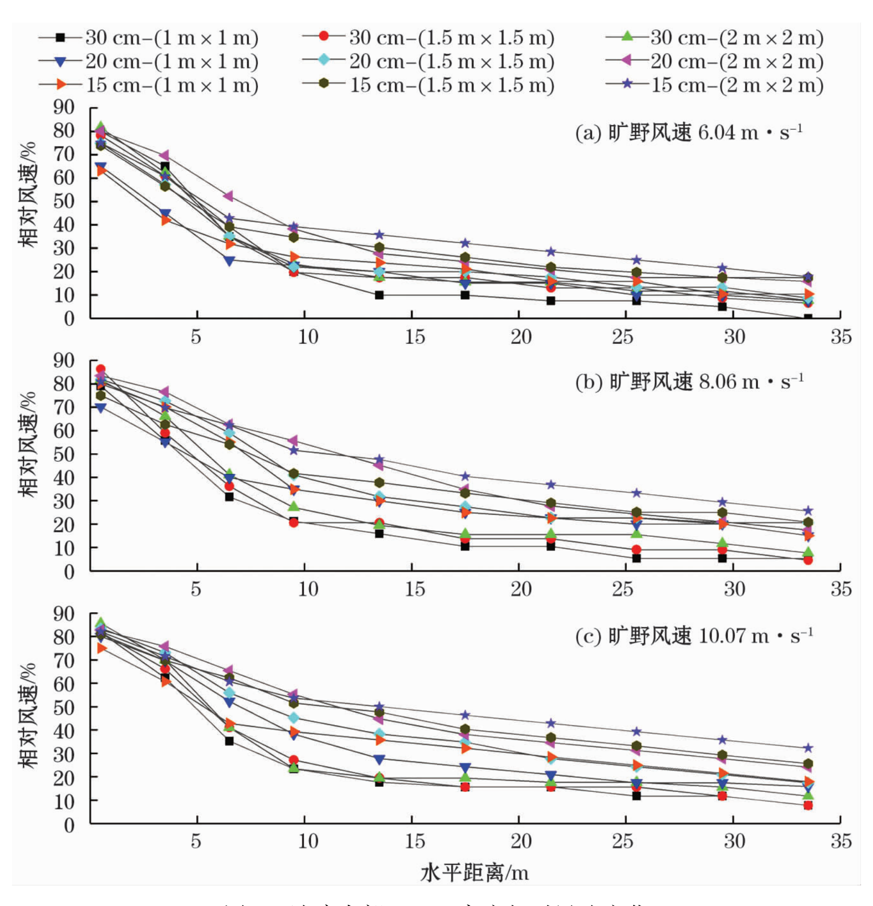


图 5 沙障内部 0.1 m 高度相对风速变化

Fig. 5 Variation of relative wind velocity at 0.1 – m height in sand barrier

表 1 风速变化拟合函数

Tab. 1 Fitting functions of wind speed variation

风速 /(m·s⁻¹)	沙障高度 /cm	沙障规格	函数形式	拟合参数			拟合系数	
				R^2	F 值	P 值	a	b
6.04	30	1 m×1 m	对数函数	0.942	129.830	0	-0.749	2.654
		1.5 m×1.5 m	对数函数	0.966	229.334	0	-0.915	3.283
		2 m×2 m	对数函数	0.957	176.372	0	-0.870	3.064
	20	1 m×1 m	对数函数	0.974	299.136	0	-0.706	2.835
		1.5 m×1.5 m	对数函数	0.971	268.869	0	-0.678	3.261
		2 m×2 m	对数函数	0.960	193.778	0	-0.602	3.071
	15	1 m×1 m	对数函数	0.992	948.393	0	-0.606	2.662
		1.5 m×1.5 m	对数函数	0.985	527.654	0	-0.579	2.966
		2 m×2 m	对数函数	0.906	76.774	0	-0.763	3.986
8.06	30	1 m×1 m	对数函数	0.936	117.117	0	-1.062	4.069
		1.5 m×1.5 m	对数函数	0.969	247.746	0	-1.119	4.124
		2 m×2 m	对数函数	0.957	180.125	0	-0.993	3.943
	20	1 m×1 m	对数函数	0.948	147.095	0	-0.937	3.800
		1.5 m×1.5 m	对数函数	0.969	247.316	0	-0.881	4.125
		2 m×2 m	对数函数	0.955	168.513	0	-0.984	5.018
	15	1 m×1 m	对数函数	0.978	351.147	0	-0.830	3.891
		1.5 m×1.5 m	对数函数	0.908	78.969	0	-0.769	4.214
		2 m×2 m	对数函数	0.904	75.634	0	-0.881	5.003
10.07	30	1 m×1 m	对数函数	0.950	151.261	0	-1.157	4.518
		1.5 m×1.5 m	对数函数	0.934	113.727	0	-1.216	4.755
		2 m×2 m	对数函数	0.914	84.608	0	-1.235	4.966
	20	1 m×1 m	对数函数	0.945	136.190	0	-1.067	4.785
		1.5 m×1.5 m	对数函数	0.927	102.009	0	-1.190	5.551
		2 m×2 m	对数函数	0.873	55.017	0	-1.081	6.067
	15	1 m×1 m	对数函数	0.962	203.559	0	-0.967	4.929
		1.5 m×1.5 m	对数函数	0.912	82.542	0	-0.935	5.457
		2 m×2 m	对数函数	0.895	68.521	0	-0.810	5.518

分析可知,沙障内风速变化的差异是来流风速与沙障规格不同所导致。因此,拟合系数 a 与 b 是由旷野风速 V(m·s^{-1})、沙障高度 H(m)、以及沙障规格 M(m)决定的,将影响系数的各因子进行多元线性回归,拟合度较高,均在0.9以上。得到不同风速梯度下,不同高度与规格沙障内0.1 m高度处,尼龙网方格沙障防风效应的复变规律函数表达式:

$$U=(-0.07V-2H+0.07M+0.04)\ln(D)+0.53V-2.56H+0.9M-0.71 \quad (3)$$

根据公式可知,指示风速增大1 m·s^{-1},0.1 m高度处风速衰减率增加0.07倍;沙障高度增大0.1 m,0.1 m高度处风速衰减率增加0.20倍;方格边长增大1 m,0.1 m高度处风速衰减率减小0.07倍。

为检验沙障防风效应复变作用函数精度,采用不同规格沙障内实测风速变化值进行验证。如图6以 X 轴为风速模拟值,Y 轴为风速实测值进行线性回归,斜线表示二者散点回归的线性关系。验证可知:风速模拟值与风速实测值之间相关性较好,总体拟合度均达85%以上。因此,不同风速梯度下,不同高度不同规格方格沙障防风效应复变规律可以使用上述函数表达式进行计算,亦可由此进行合理防护宽度的计算公式推导。

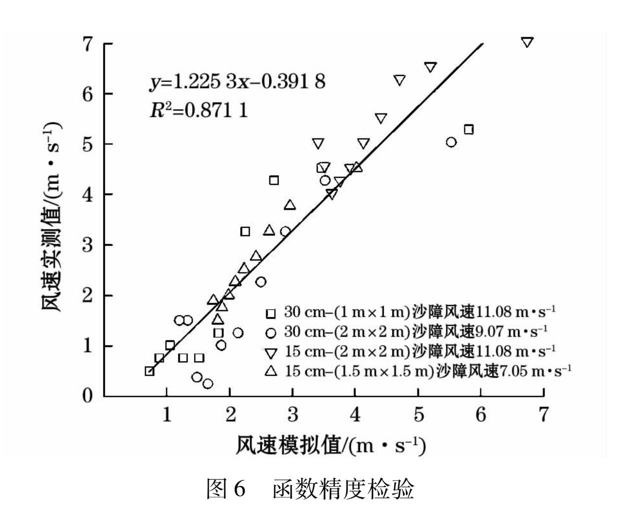


图6 函数精度检验

Fig. 6 Function accuracy test

2.4 沙障防风效应复变规律的应用

通过多次函数拟合后发现,沙障内0.1 m高度风速均以 $U = a \cdot \ln(D) + b$ 对数函数的形式降低,对数函数即为不同规格尼龙网沙障防风效应的复变作用形式,并非简单的数学累加。将复变函数所得风速模拟值与风速实测值进行线性回归检验,拟合度达到87.11%,说明该函数能够用于表达尼龙网方格沙障防风效应的复变规律。基于公式(3),当沙障内风速 U 降低至起沙风速 V_0,气流通过沙障的防护距离D即为合理防护宽度D′。因此,合理防护宽度D′计算公式为:

$$D' = \exp\left(\frac{V_0 - 0.53V + 2.56H - 0.9M + 0.71}{-0.07V - 2H + 0.07M + 0.04}\right) \quad (4)$$

统计当地风速数据可知,小于10 m·s^{-1}的起沙风占多年起沙风的97%以上。因此,沙障铺设中考虑的最大风速 V 为10 m·s^{-1},由此可以计算乌兰布和沙漠铺设尼龙网方格沙障的合理宽度(表2)。

表2 合理防护宽度计算

Tab. 2 Calculated results of reasonable windproof width

沙障高度/cm	沙障规格	2 m风速/(m·s^{-1})	0.1 m起沙风速/(m·s^{-1})	计算防护宽度/m	设计防护宽度/m
30	1 m×1 m	10	3.5	2.79	3.0
	1.5 m×1.5 m	10	3.5	4.25	4.5
	2 m×2 m	10	3.5	6.65	8.0
20	1 m×1 m	10	3.5	4.45	5.0
	1.5 m×1.5 m	10	3.5	7.53	9.0
	2 m×2 m	10	3.5	13.26	14.0
15	1 m×1 m	10	3.5	6.08	7.0
	1.5 m×1.5 m	10	3.5	11.07	12.0
	2 m×2 m	10	3.5	21.24	22.0

3 讨论

研究发现,沙障的存在改变了近地表的气流场,不同指示风速下沙障高度与规格对近地表的气流有重要影响[17],造成沙障防风效应的变化,从而影响沙障的复变规律。相同高度与规格的沙障内,指示风速增大,沙障防风效应下降;同一指示风速下,沙障高度降低与规格增大,均使得沙障防风效应下降[18]。试验测定了各类型沙障相同测点位置处的风速情况,防风效应在沙障前缘呈非线性增大,复变作用明显。图4反映出,气流遇到沙障后,风能会重新分配,风速迅速下降,随着顺风距离的增加,风速变化逐渐减小,气流场在均匀排列的沙障内形成相对稳定的状态[19-20]。沙障前缘所表现出的防风效应复变作用是单格沙障防风效应相互叠加的结果[21]。就单格沙障而言,气流在沙障迎风障体与背风障体前阻滞减速,在其后涡流减速,网顶部气流则抬升加速[22],迎风障体与背风障体对风场的影响存在累加效应[23];两侧平行于风向的障体则有效拦截了侧向绕流,障格内形成弱风强压区,致使抬升的高速气流无法下降,障格内风速难以恢复。方格沙障成片分布,单格沙障的防风效应不断叠加,风速在设障区域始终处于低速状态。沙障高度的降低与规格的增大,使气流在沙障内得到一定程度的恢复,当沙障规格超出单一沙障障体的有效防护距离,方格沙障则类似于相互独立的单带沙障[19],复变作用消失。同一障格内,指示风速增加,障体的防风效应减弱,有效防护距离缩短[24],前后障体减速区的叠加范围减小,沙障复变作用降低。同时,方格沙障的复变作用使得风沙流沙粒在沙障前缘沉降,积沙较多,一定程度上降低了沙障前缘的防护效果,从而使沙障防风效应在沙障内部出现二次剧烈增加。随着时间推移,积沙向沙障纵深漫延,防风能力下降,复变作用降低。综上可知,沙障对风速的削弱存在复变作用,该作用受到指示风速、沙埋速度与沙障高度、规格的影响。

本文根据各规格沙障内风速变化特征,揭示尼龙网方格沙障防风效应的复变规律。研究表明,沙障的高度、规格以及风沙流运动时的风速都是影响沙障防风效应的主要因素[25],因此,将上述影响因素以数值形式与复变作用对数函数各系数分别进行多元线性回归,得到尼龙网方格沙障防风效应复变规律的函数表达式。当沙障内风速降低至起沙风速(即 $U = V_0$)时,视沙障防护距离为合理防护宽度,推导出合理防护宽度计算公式(公式4)。沙埋速度会降低复变作用,应确定合理防护宽度,预留安全宽度。根据实地观测,整个风季,因为沙障前缘不同程度积沙而导致防护效益下降,按照每年因沙埋完全失去防风效应的沙障宽度 L 取值,设计防护 n 年的合理防护宽度的计算公式为:

$$D = \exp\left(\frac{V_0 - 0.53V + 2.56H - 0.9M + 0.71}{-0.07V - 2H + 0.07M + 0.04}\right) + L \cdot n \quad (5)$$

式中:V_0 为0.1 m高度处起沙风(m·s^{-1});V 为2 m高度处的旷野风速(m·s^{-1});H 为沙障高度(m);M

为方格沙障边长(m);L 为年平均沙埋宽度(m);n 为设计防护年数。前人根据沙障沙埋速度、有效使用年限及预留安全宽度确定合理防护宽度[26],该种设计能够有效抑制风沙流危害,却未考虑沙障内是否会有二次起沙。本文充分考虑了沙障对风速的削弱作用,使沙障内风速降低至起沙风速以下,有效避免了二次起沙,更具实践意义。

4 结 论

(1)不同指示风速下,不同高度、不同规格尼龙网方格沙障内风速均表现出障格前缘急剧降低、中部缓慢降低、后缘趋于稳定的变化规律,其中沙障前缘防风效应复变作用最为明显。30 cm 高度 1 m×1 m、1.5 m×1.5 m 和 2 m×2 m 规格沙障分别在前缘 3.5 m、6.5 m 和 6.5 m 范围内,降低风速 50% 以上;20 cm 高度 3 种规格沙障分别在前缘 9.5 m、9.5 m 和 13.6 m,降低风速 50% 以上;15 cm 高度 3 种规格沙障分别在前缘 9.5 m、13.6 m 和 13.6 m,降低风速 50% 以上。

(2)沙障防风效应的复合变化是不同指示风速下沙障高度与沙障规格共同作用的结果,尼龙网方格沙障防风效应的复变作用均为单调递减的对数函数形式。根据其复变规律构建尼龙网方格沙障合理防护宽度的计算模型为:

$$D = \exp\left(\frac{V_0 - 0.53V + 2.56H - 0.9M + 0.71}{-0.07V - 2H + 0.07M + 0.04}\right) + L \cdot n。$$

(3)建议在乌兰布和沙漠铺设尼龙网方格沙障的宽度为:1 m×1 m、1.5 m×1.5 m 和 2 m×2 m 规格下,30 cm 高度沙障依次铺设 3.0 m、4.5 m 和 8.0 m;20 cm 高度沙障依次铺设 5.0 m、9.0 m 和 14.0 m;15 cm 高度沙障依次铺设 7.0 m、12.0 m 和 22.0 m。

参考文献(References):

[1] Ning B Y, Ma J X, Jiang Z D. Evolution characteristics and development trends of sand barriers[J]. Journal of Resources and Ecology, 2017, 8(4): 398-404.

[2] 张克存,屈建军,董治宝,等. 格状沙障内风速波动特征初步研究[J]. 干旱区研究,2006,23(1):93-97.[Zhang Kecun, Qu Jianjun, Dong Zhibao, et al. Preliminary research on fluctuation characteristics of wind speed over checkerboard sand barriers[J]. Arid Zone Research, 2006, 23(1): 93-97.]

[3] Qu J J, Zu R P, Zhang K C, et al. Field observations on the protective effect of semi-buried checkerboard sand barriers[J]. Geomorphology, 2007, 88(1-2): 193-200.

[4] 张春来,邹学勇,程宏,等. 包兰铁路沙坡头段防护体系近地面流场特征[J]. 应用基础与工程科学学报,2006,14(3):353-360.[Zhang Chunlai, Zou Xueyong, Cheng Hong, et al. Near surface air flow filed across the shelter belt of Shapotou section, Baotou-Lanzhou line[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2006, 14(3): 353-360.]

[5] 董智,李红丽,汪季,等. 土工格栅沙障防风积沙效应风洞模拟实验[J]. 中国水土保持科学,2007,5(1):35-39.[Dong Zhi, Li Hongli, Wang Ji, et al. Wind tunnel test on effect of controlling wind and deposited sand of geogrid sand-barrier[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2007, 5(1): 35-39.]

[6] 张克存,屈建军,牛清河,等. 青藏铁路沿线砾石方格固沙机理风洞模拟研究[J]. 地球科学进展,2010,25(3):284-289.[Zhang Kecun, Qu Jianjun, Niu Qinghe, et al. Simulative research on the mechanism of rocky checkerboard sand barriers along Qinghai-Tibet railway in wind tunnel[J]. Advances in Earth Science, 2010, 25(3): 284-289.]

[7] 周娜,张春来,田金鹭,等. 半隐蔽式草方格沙障凹曲面形成的流场解析及沉积表征[J]. 地理研究,2014,33(11):2 145-2 156.[Zhou Na, Zhang Chunlai, Tian Jinlu, et al. Flow field controlling the concave surface of the semi-buried checkerboards and its characterization by grain sizes of sediments[J]. Geographical Research, 2014, 33(11): 2 145-2 156.]

[8] Zhang S, Ding G D, Yu M H, et al. Application of boundary layer displacement thickness in wind erosion protection evaluation: Case study of a *Salix psammophila* sand barrier[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, 16(4): 1-17.

[9] 韩致文,刘贤万,姚正义,等. 复膜沙袋阻沙体与芦苇高立式方格沙障防沙机理风洞模拟实验[J]. 中国沙漠,2000,20(1):41-45.[Han Zhiwen, Liu Xianwan, Yao Zhengyi, et al. Wind tunnel test on sand-preventing mechanism of double-filmed sand-bag obstacle and upright checkerboard sand-barrier[J]. Journal of Desert Research, 2000, 20(1): 41-45.]

[10] 王世杰,李生宇,徐新文,等. 阿拉尔—和田沙漠公路机械防沙体系内风沙沉积的粒度特征[J]. 干旱区资源与环境,2014,28(6):130-135.[Wang Shijie, Li Shengyu, Xu Xinwen, et al. Grain-size characteristics in the physical sand protection system of the Alar-Hetian desert highway[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2014, 28(6): 130-135.]

[11] 韩致文,陈广庭,胡英娣,等. 塔里木沙漠公路防沙体系建设几个问题的探讨[J]. 干旱区资源与环境,2000,14(2):35-40.[Han Zhiwen, Chen Guangting, Hu Yingdi, et al. Discussion on problems about construction of sand-controlling systems along desert highway in Tarim Basin, Taklimakan Desert[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2000, 14(2): 35-40.]

[12] 马学喜,李生宇,王海峰,等. 流动沙漠地形起伏区尼龙网方格沙障破损程度的空间分异[J]. 自然灾害学报,2015,24(2):81-88.[Ma Xuexi, Li Shengyu, Wang Haifeng, et al. Spatial differentiation of breakage degree of nylon net checkerboard barrier in sites with rugged terrain in Taklimakan Desert[J]. Journal of Natural Disasters, 2015, 24(2): 81-88.]

[13] 刘芳,郝玉光,徐军,等. 乌兰布和沙区风沙运移特征分析[J]. 干旱区地理,2014,37(6):1 163-1 169.[Liu Fang, Hao Yuguang, Xu Jun, et al. Sand flow characteristics in Ulan Buh Desert[J]. Arid Land Geography, 2014, 37(6): 1 163-1 169.]

〔14〕 王丽英,李红丽,董智,等. 沙柳方格沙障对库布齐沙漠防风固沙效应的影响〔J〕. 水土保持学报,2013,27(5):115 – 124.〔Wang Liying, Li Hongli, Dong Zhi, et al. Effect of *Salix psammophila* checkerboard sand barrier on wind prevention and sand resistance in Kubuqi Desert〔J〕. Journal of Soil and Water Conservation,2013,27(5):115 –124.〕

〔15〕 屈建军,喻文波,秦晓波. HDPE 功能性固沙障防风效应试验〔J〕. 中国沙漠,2014,34(5):1 185 – 1 193.〔Qu Jianjun, Yu Wenbo, Qin Xiaobo. Wind-protecting efficiency of HDPE functional sand-fixing barriers〔J〕. Journal of Desert Research,2014,34(5):1 185 –1 193.〕

〔16〕 Wiggs G F S, Livingstone I, Thomas D S G, et al. Airflow and roughness characteristics over partially vegetated linear dunes in the Southwest Kalahari Desert〔J〕. Earth Surface Processes and Landforms,1996,21:19 –34.

〔17〕 Hagen L J, Armbrust D V. Aerodynamic roughness and saltation trapping efficiency of tillage ridges〔J〕. Transaction of the ASAE, 1992,35(4):1 179 –1 184.

〔18〕 王睿,周立华,陈勇,等. 库布齐沙漠机械防沙措施的防护效益〔J〕. 干旱区研究,2017,34(2):330 –336.〔Wang Rui, Zhou Lihua, Chen Yong, et al. Wind-blow sand control effert of sand barriers used in the Hobq Desert〔J〕. Arid Zone Research, 2017, 34 (2):330 –336.〕

〔19〕 Jia W R, Zhang C L, Zou X Y, et al. Effects of ridge height and spacing on the near-surface airflow field and on wind erosion of a sandy soil: Results of a wind tunnel study〔J〕. Soil & Tillage Research,2019,186:94 –104.

〔20〕 Huang N, Xia X P, Tong D. Numerical simulation of wind sand movement in straw checkerboard barriers〔J〕. The European Physical Journal E,2013,36(9):99 –106.

〔21〕 李永平,冯永忠,杨改河. 北方旱区农田防护林防风效应研究〔J〕. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2009,37(6):92 –98.〔Li Yongping, Feng Yongzhong, Yang Gaihe. Study on windbreak effect of farmland shelter belts in dry farmlands of north China〔J〕. Journal of Northwest A & F University(Natural Science Edition),2009,37(6):92 –98.〕

〔22〕 屈建军,刘贤万,雷加强,等. 尼龙网栅栏防沙效应的风洞模拟实验〔J〕. 中国沙漠,2001,21(3):62 – 66.〔Qu JianJun, Liu Xianwan, Lei Jiaqiang, et al. Simulation experiments on sand-arresting effect of nylon net fence in wind tunnel〔J〕. Journal of Desert Research,2001,21(3):62 –66.〕

〔23〕 袁鑫鑫,王海峰,雷加强,等. 不同间距双排尼龙阻沙网防风效应的风洞模拟〔J〕. 中国沙漠,2016,36(5):1 238 – 1 246.〔Yuan Xinxin, Wang Haifeng, Lei Jiaqiang, et al. Wind tunnel simulation of windbreak effect of double-row nylon net fence with different interval〔J〕. Journal of Desert Research,2016,36(5):1 238 –1 246.〕

〔24〕 唐玉山,安志山,张克存,等. 不同结构单排林带防风效应的风洞模拟〔J〕. 中国沙漠,2012,32(3):647 –654.〔Tang Yushan, An Zhishan, Zhang Kecun, et al. Wind tunnel simulation of windbreak effect of single-row shelter belts of different structure〔J〕. Journal of Desert Research,2012,32(3):647 –654.〕

〔25〕 钟卫,孔纪名,杨涛,等. 植被沙障对近地表风沙流特征影响的风洞实验〔J〕. 干旱区研究,2009,26(6):872 –876.〔Zhong Wei, Kong Jiming, Yang Tao, et al. Wind tunnel test about the effect of vegetation sand-barrier on wind-blown sand flow near ground surface〔J〕. Arid Zone Research,2009,26(6):872 –876.〕

〔26〕 徐峻龄,裴章勤,王仁化. 半隐蔽式麦草方格沙障防护带宽度的探讨〔J〕. 中国沙漠,1982,2(3):20 – 27.〔Xu Junling, Pei Zhangqin, Wang Renhua. A research on the with of the protection belt of half-hidden straw checkerboard barriers〔J〕. Journal of Desert Research,1982,2(3):20 –27.〕

Compound Rules of Windproof Effect of Nylon Grid Sand Barrier

WEI Xiang-hong, ZUO He-jun, YAN Min, JIA Guang-pu

(*College of Desert Control Science and Engineering/Inner Mongolia Key Laboratory of Aeolian Physics and Desertification Control Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot* 010011, *Inner Mongolia, China*)

Abstract: Nine kinds of nylon grid barriers with different heights and sizes were laid in the wind-blown sand observation filed in the Ulanbuh Desert. The characteristics of wind-flow field under different wind speeds and the compound rule of windproof effect of sand barriers were revealed. The results showed that the compound change of windproof effect of grid sand barriers was affected by the height and size of sand barrier under different wind speeds. The wind speed at 0.1 – m height near the sand barrier was decreased logarithmically with the increase of windproof width, which indicated that the attenuation rate of wind speed near the sand barrier was increased by 0.07 times when the wind speed increased by 1 m · s^{-1}; it was increased by 0.20 times when the height of sand barrier was increased by 0.1 m; and it was decreased by 0.07 times when the length of grid side was increased by 1 m. Among the nine kinds of grid sand barriers observed, compound effect of 1 m × 1 m sand barrier with 30 – cm height was the highest, but that of 2 m × 2 m sand barrier with 15 – cm height was the lowest. The results could provide the basic data and theoretical support for determining the reasonable windproof width of sand barrier, saving the layout cost of sand barrier, and optimizing the technology of sand barrier layout.

Key words: nylon grid sand barrier; wind flow; windproof effect; compound change; Ulanbuh Desert